

# 三维表面形貌的逾渗特性表征<sup>\*</sup>

张彤<sup>1</sup>, 刘小君<sup>1</sup>, 董磊<sup>2</sup>, 刘焜<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学摩擦学研究所 合肥 230009; 2. 中北大学机械工程学院 太原 030051)

**摘要:**为了建立表面形貌微观结构与其功能特性之间的关系,基于逾渗理论建立了表面形貌的逾渗模型,用逾渗概率、空体集团平均大小和空体集团分布系数对三维表面形貌的逾渗特性进行了量化表征。采用数字滤波技术生成具有给定自相关函数和纹理取向的数字化粗糙表面,分析了具有相同均方根粗糙度而结构不同的三维表面形貌的逾渗特性,给出了表面纹理方向参数和自相关长度对表面逾渗特性的影响,并借助部分三维形貌参数(ISO25178)建立了表面形貌与逾渗特性参数间的量化关系。结果表明:对于各向异性表面,沿横向搜索跨越空体集团,表面逾渗发生时的表面高度、逾渗阈值和逾渗体积均随着表面纹理方向参数的增大呈减小趋势,而空体集团分布系数呈增大趋势;沿纵向搜索时,其变化规律与横向相反。对于各向同性表面,逾渗发生时的表面高度和逾渗阈值随着表面自相关长度的增大呈先减小后小幅增大趋势,而逾渗体积和空体集团平均大小呈逐渐减小趋势。研究结果为面向功能的表面形貌设计提供了理论基础。

**关键词:**三维表面形貌;逾渗;表征参数;逾渗体积

**中图分类号:** TH161.14 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.1540

## Percolation characterization of three-dimensional surface topography

Zhang Tong<sup>1</sup>, Liu Xiaojun<sup>1</sup>, Dong Lei<sup>2</sup>, Liu Kun<sup>1</sup>

(1. Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to establish the relationship between the microstructure of surface topography and its functional properties, the percolation model of surface topography is established based on percolation theory. The percolation characterization of three dimensional (3D) surface topography is achieved with the percolation probability, the mean size of void clusters and the distribution coefficient of void clusters. The digital rough surfaces with given autocorrelation function (ACF) and orientation parameters are generated based on digital filter method. The percolation characteristics of 3D rough surfaces with the same root mean square (RMS) roughness and different structures are analyzed. The effects of surface texture parameter and autocorrelation length on the percolation characteristics of surface topography are obtained. The quantitative relationship between surface topography and percolation parameters is established by 3D characterization parameters (ISO25178). The results show that the surface height, the percolation threshold and percolation volume decrease with the increase of the surface texture parameter while searching the spanning void cluster of the anisotropic surfaces along the transverse direction. The distribution coefficient of void clusters increases with the increase of surface texture parameter. The changing law is opposite to the transverse while searching along the longitudinal direction. For the isotropic surfaces, the surface height and the percolation threshold decrease firstly and then increase slightly. Besides, the percolation volume and the distribution coefficient of void clusters decrease gradually with increase of the autocorrelation length. This study provides a theoretical basis for the design of function-oriented surface topography.

**Keywords:** three dimensional surface topography; percolation; characterization parameters; percolation volume

## 0 引言

工程表面的功能特性与表面形貌的微观几何结构具有紧密联系<sup>[1-2]</sup>。当两个名义上的平面接触时,由于表面形貌存在峰和谷及峰谷之间的连通状况不同,接触只发生在离散的点上<sup>[3]</sup>,界面间存在一个随机无序变化的空隙空间,邻接的空隙位置相互连接形成连通内外边界的贯通空隙空间<sup>[4]</sup>,但随着实际接触面积与名义接触面积的比值增大到一定值时,界面间存在的贯通空隙空间突然消失,出现逾渗现象<sup>[5-7]</sup>,流体在界面间的流动受到这种随机结构连通性的影响。对一般设备而言,减小或消除间隙即贯通空隙空间是阻止泄漏主要途径<sup>[8]</sup>,但在一些情况中,又需要随机间隙空间的连通来改善零件的润滑性能<sup>[6]</sup>。因此,表面形貌谷与谷之间相互连通是否存在贯通通路的这种逾渗状态演变特性直接影响流体的流动与分布,从而影响表面间的润滑和密封性能。合理表征和描述表面形貌逾渗特性对提高产品质量和设备的运行性能等具有重要的价值。

国内外学者对表面形貌的表征进行了大量的研究,例如基准参数法<sup>[9]</sup>、Motif法<sup>[10]</sup>、分形法<sup>[11]</sup>、和小波分析法<sup>[12-13]</sup>等,这些方法大量挖掘了表面形貌几何特征所蕴含的高度信息和空间信息。乐静等人<sup>[14]</sup>提出了一种基于多层序列图像的三维表面粗糙度检测方法,并探究了表面粗糙度参数表征的可行性;Pfestorf M等人<sup>[15]</sup>提出了表面形貌表征的机械流变模型,基于支承率曲线分析了界面的承载形式,给出了封闭空体面积比和开放空体面积比及相应体积的定义和算法;Liu X. J.等人<sup>[16]</sup>基于数学形态学理论,通过多尺度腐蚀递归运算得到表面连通性指数来定量描述表面结构截面上的连通性特征,实现了对谷的特征的表征;Senin N等人<sup>[17]</sup>利用数字图像处理中的分割技术,基于局部表面纹理特性的均匀性对工程表面的微米级和纳米级形貌进行聚类分割,实现了表面形貌有意义的分区,有利于了解工程表面形态、结构和功能间的联系;Wolski M等人<sup>[18]</sup>等将增广方差方向转换方法应用于三维工程表面小尺寸图像的表征,相比于其他一般表征方法能检测到表面不同尺度的微小变化。ISO25178标准<sup>[19]</sup>中基于支承率曲线的功能参数描述了表面实体材料和空体等统计特征。这些研究从不同的角度揭示了表面形貌蕴含的信息,但对于表面形貌逾渗特性的描述和表征方面,目前相应的研究比较缺乏。

Persson B. N. J.等人<sup>[20]</sup>和Bottigione F等人<sup>[21]</sup>应用逾渗理论和接触力学理论解释了粘弹性体-刚性体界面的密封机理,并提出了预测泄漏率的方法,但对于逾渗阈值的选用主要基于二维座逾渗系统的理论值,忽略了表面微观形貌及界面尺度有限性对逾渗阈值的影响。本文

基于逾渗理论研究了三维表面形貌的逾渗特性,试图从理论上揭示表面形貌谷与谷之间相互连通状态演变特性,并对三维表面形貌的逾渗特性进行量化表征,分析了表征参数随表面高度的变化规律及具有不同微观几何结构表面逾渗特性的差异,以期从表面微观拓扑结构的角来探究表面形貌与密封和润滑性能间的关联。

## 1 表面形貌的逾渗模型及其表征参数

### 1.1 表面形貌的逾渗模型

图1(a)所示为三维表面形貌示意图,某高度截面的微观结构如图1(b)所示,基于机械流变模型<sup>[15]</sup>,根据空体区域与边界连接情况,将截面上微结构分成实体材料区、跨越空体集团和非跨越空体集团3个部分。跨越空体集团由空体区域相互连接从截面的一个边界跨越到对称边界,具有长程连接性,形成了流体的流动通道;与跨越空体集团相反,非跨越空体集团与截面一个边界相通或不与边界相通,有利于流体的存储。

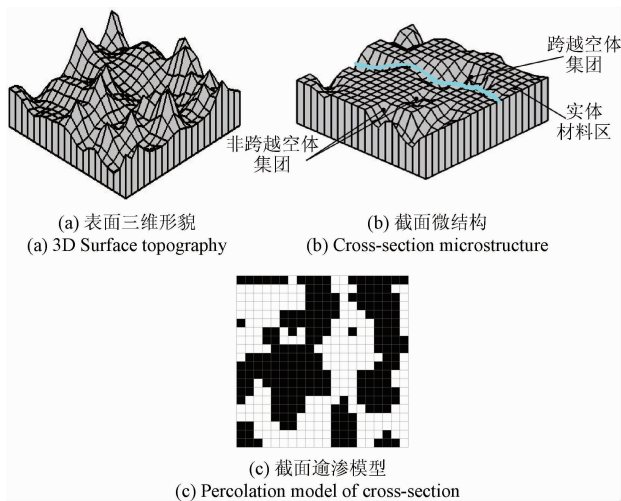


图1 表面形貌及其逾渗模型

Fig. 1 Surface topography and its percolation model

在给定分辨率下,根据截面的微结构分布情况,可获得截面的二值图像,二值图像以0和1的逻辑矩阵表示,其中值为0的点对应实体材料位置,值为1的点对应空体位置即流体存在的位置。基于逾渗理论概念<sup>[22]</sup>,截面二值图像可用四连通座逾渗模型来描述,二值图像上所有实体材料位置和空体位置构成了四连通座逾渗模型的所有座,图1(c)所示为图1(b)截面对应的座逾渗模型,实体材料位置对应座逾渗模型中未被占据的座,显示为黑色格点;空体位置对应模型中被占据的座,显示为白色格点,从座逾渗模型中可清楚分辨出由空体位置相互连接组成的跨越空体集团与非跨越空体集团。

对图 1(a)所示表面,从最高峰到最低谷依次截取,得到各截面的逾渗模型,如图 2 所示,可以看出在表面最高峰处,截面上只存在跨越空体集团;从表面最高峰向下增加截断深度,跨越空体集团面积逐渐减小而实体材料区面积逐渐增大;截断深度继续增加,出现非跨越空体集团,此时截面上 3 种区域共存;随着非跨越集团逐渐增加,跨越空体集团消失,此时截面上只存在非跨越空体集团和实体材料区;在最低谷处,截面上只存在实体材料区。由以上分析可以看出,跨越空体集团经历了由有-无的突变过程,而非跨越空体集团经历了无-有-无的过程。

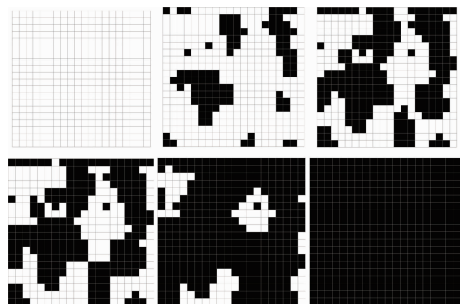


图 2 不同高度截面的逾渗模型

Fig. 2 Percolation models of cross-section at different heights

## 1.2 表面逾渗特征的表征参数

三维粗糙表面经数字采样后为分布在空间域中的离散信号,在给定分辨率条件下,设纵、横坐标轴上的采样点数均为  $N$ ,截面上空体位置和实体材料位置构成了  $N \times N$  个格点的座逾渗模型,引入以下几个物理量来精确描述截面上的空体集团。设  $C$  表示截面上随机分布的跨越和非跨越空体集团,当测量面积较小时,虽然从视觉上不难直观判断空体集团的连接性,但当测量面积较大时,为了精确统计和分析空体集团的特征,本文采用 Hoshen J 等人<sup>[23]</sup>给出的标识算法对空体集团进行标识,判断截面上是否存在跨越空体集团。

在表面高度为  $h$  的截面逾渗模型中,设跨越空体集团占据的格点数为  $s(N)$ ,将跨越空体集团占据格点数与截面总格点数的比值定义为逾渗概率  $P(h)$ ,当截面上不存在跨越空体集团时,逾渗概率为 0,在有限尺度范围内逾渗概率  $P(h)$  表示为:

$$P(h) = s(N)/N^2 \quad (1)$$

从表面最高峰开始截取平面,在表面高度为  $h$  时,截面上跨越空体集团突然消失,此时逾渗概率  $P(h) = 0$ ,定义该表面高度  $h$  为逾渗发生时的高度,用  $h_p$  表示。

$$h_p = \sup(h, P(h) = 0) \quad (2)$$

表面高度  $h > h_p$  时,截面上存在跨越空体集团;表面高度  $h \leq h_p$  时,跨越空体集团长程连接性消失,截面上只

存在非跨越集团,为了描述去除跨越空体集团后截面上空体集团的平均大小,引入  $S_{av}$  来表示截面上空体集团平均占据格点数。

$$S_{av} = E(|C|) = \begin{cases} \sum_s s w_s, & h \leq h_p \\ \sum_s s w_s - s(N) w_{s(N)}, & h > h_p \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $s$  表示截面上空体集团包含空体位置数即格点数,  $w_s$  表示随机选择一个空体位置属于包含格点数为  $s$  的空体集团的概率,  $w_{s(N)}$  则表示随机选择一个空体位置属于包含格点数为  $s(N)$  的跨越空体集团的概率,  $w_s$  表达式为:

$$w_s = P(|C| = s) = s n_s / \sum_s s n_s \quad (4)$$

式中:  $n_s$  定义为在给定分辨率下,包含格点数为  $s$  的空体集团数与截面上格点总数的比值。

此外,截面上所有空体集团的分布情况可用空体集团分布系数  $\kappa$  来描述,其定义如式(5)所示,用  $\kappa$  表示截面上平均每个空体位置包含的空体集团的数目。

$$\kappa = E(|C|^{-1}) = \sum_s \frac{1}{s} w_s \quad (5)$$

## 2 表面形貌逾渗特性分析

基于上述表面形貌逾渗特性的表征方法,对具体的三维粗糙表面研究逾渗表征参数随表面高度的变化规律、分析各向同性和各向异性表面逾渗特性的差异性及相应逾渗参数与表面形貌结构参数间的关系,进一步探究表面形貌微观几何结构与功能特性间的关联性。

在工程实际中,由于加工方法不同,导致零件表面微观形貌分布存在差异。具有相同均方根粗糙度参数的表面其空间几何结构分布可能完全不同,表面形貌的逾渗特性也会存在一定的差异。本文基于数字滤波技术,采用文献[24-25]中的方法,通过计算机模拟生成具有给定自相关函数的粗糙表面,表面的自相关函数采用粗糙表面模拟中常用的指数形式<sup>[24]</sup>,如式(6)所示。

$$R(x, y) = \sigma^2 \exp(-2.3((k/\beta_x)^2 + (l/\beta_y)^2)^{1/2}) \quad (6)$$

式中:  $\sigma$  表示表面均方根粗糙度,  $k, l$  分别表示为  $x, y$  方向的距离,  $\beta_x, \beta_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的自相关长度;当  $\beta_x = \beta_y$  时为各向同性表面,当  $\beta_x \neq \beta_y$  时为各向异性表面。

### 2.1 表面逾渗表征参数随表面高度的变化

三维形貌及其逾渗概率曲线和支承率曲线如图 3 所示。图 3 中三维表面形貌 I 为模拟产生的各向同性高斯表面,其中表面的长宽均为  $128 \mu\text{m}$ ,自相关长度  $\beta_x$  和  $\beta_y$  都取为  $3 \mu\text{m}$ ,生成的表面均方根粗糙度  $S_q = 0.05 \mu\text{m}$ ,  $S_z = 0.4 \mu\text{m}$ 。

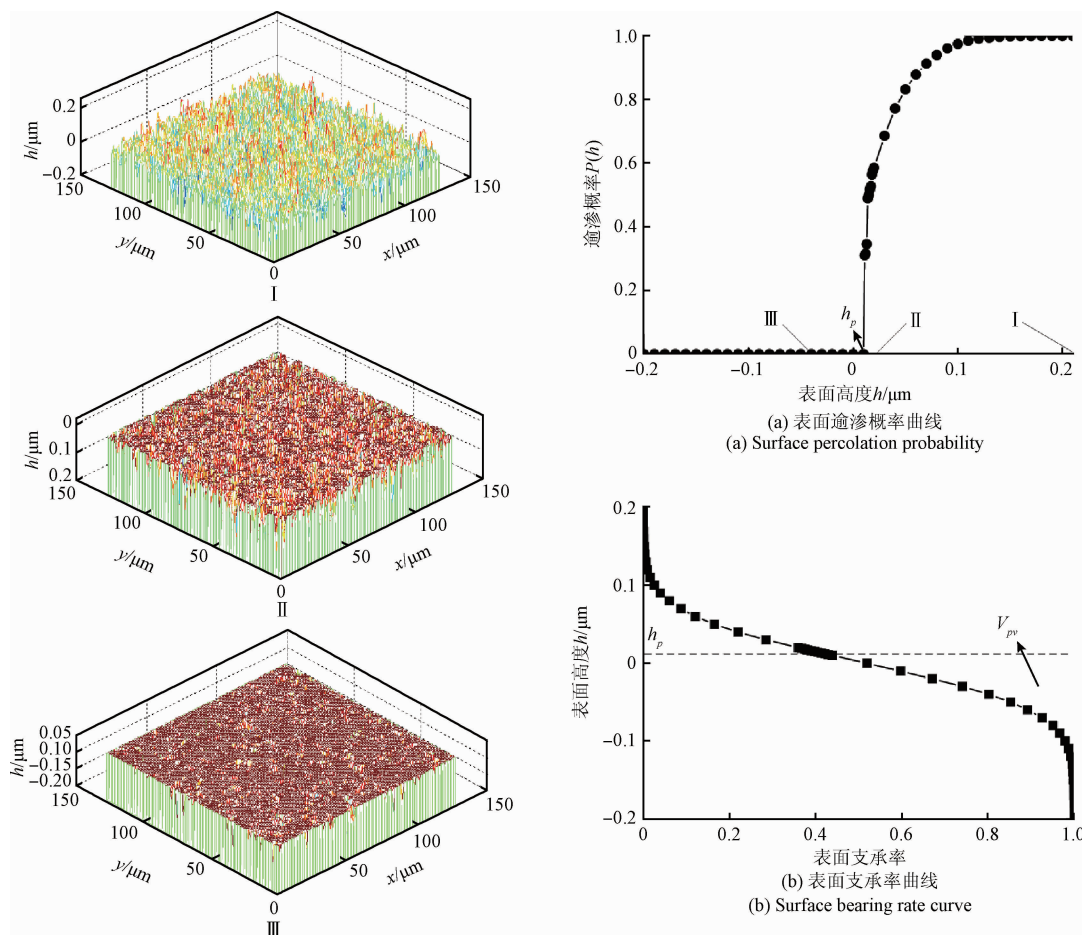


图3 表面形貌及其逾渗概率曲线和支承率曲线

Fig.3 Surface topography and its percolation probability curve and bearing rate curve

沿横向即  $y$  向搜索跨越空体集团,从图 3(a) 可以看出逾渗概率  $P(h)$  随表面高度  $h$  的变化分 3 个阶段,当表面高度  $h > 0.1 \mu\text{m}$  时,逾渗概率  $P(h)$  趋近于 1,截面上只存在跨越空体集团和实体材料区; $h$  在  $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$  高度范围时,逾渗概率  $P(h)$  急剧减小至 0,该区间内截面微结构分布如图中表面三维形貌 II 所示,截面上跨越空体集团、非跨越空体集团和实体材料区三种区域共存;而表面高度  $h < 0.01 \mu\text{m}$  时,如图中表面三维形貌 III 所示,截面上不存在跨域空体集团,此时逾渗概率为 0。

综上分析,由式(2)得到逾渗现象发生时表面高度  $h_p = 0.01 \mu\text{m}$ ,如图 3(b) 所示,将  $h_p$  高度处表面形貌的平均空体体积即该高度处与最低谷底之间的单位面积上的空体体积定义为表面形貌的逾渗体积,用  $V_{pv}$  表示, $V_{pv}$  值越小,意味着发生逾渗现象时谷间液体的体积越小,液体容易跨越微凸体流动,有益于润滑; $V_{pv}$  值越大,意味着发生逾渗时谷间液体的体积越大,该表面用于密封时,越不容易发生泄漏,即密封性能较好。图 3 表面 I 的逾渗体积  $V_{pv}$  为  $0.025 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ 。此外,由图 3(b) 支承率曲

线可得逾渗发生时表面高度  $h_p$  对应的表面支承率为 0.439,此值为实体材料区面积与名义面积的比值,对应截面上空体面积比为 0.561。定义  $h_p$  高度截面上空体面积比为表面形貌的逾渗阈值,用  $p_c$  表示, $p_c$  越小,意味着逾渗发生时空体位置较少,但谷间的连通性较好;反之  $p_c$  越大,说明谷间的连通性较差。总之,表面形貌的逾渗体积和逾渗阈值为探究表面形貌的逾渗特性与表面密封和润滑等性能之间的关系提供了一定的理论基础。

图 4(a) 和 (b) 所示为沿  $y$  向搜索跨越空体集团时空体集团的平均大小  $S_{av}$  和分布系数  $\kappa$  随表面高度  $h$  的变化。从图 4(a) 可以看出,在表面高度  $h$  较低时,空体集团平均大小  $S_{av}$  较小,此时空体集团多以孤立、较小的非跨越空体形式存在;当表面高度  $h$  继续增大时,空体集团平均大小  $S_{av}$  出现先增大后减小的趋势,并在表面高度  $0.01 \mu\text{m}$  处达到最大值,这是由于随着表面高度  $h$  增加,实体材料面积减小,空体区域面积增大,非跨越空体集团逐渐相互合并成更大的非跨越空体集团,当表面高度  $h$  进一步增加时,大量的非跨越空体集团迅速连接形成跨



越空体集团,导致非跨越空体集团平均大小  $S_{av}$  急剧减小;与图 3(a)对比可以看出,  $S_{av}$  值突变处对应的表面高度  $h$  与逾渗概率  $P(h)$  发生突变时对应的表面高度  $h_p$  值相同,该现象与 Grimmitt  $G^{[22]}$  描述逾渗概率与集团平均大小在同一概率处发生突变结论相一致,说明逾渗理论可以有效的用来描述表面形貌空体集团连接性的突变现象。

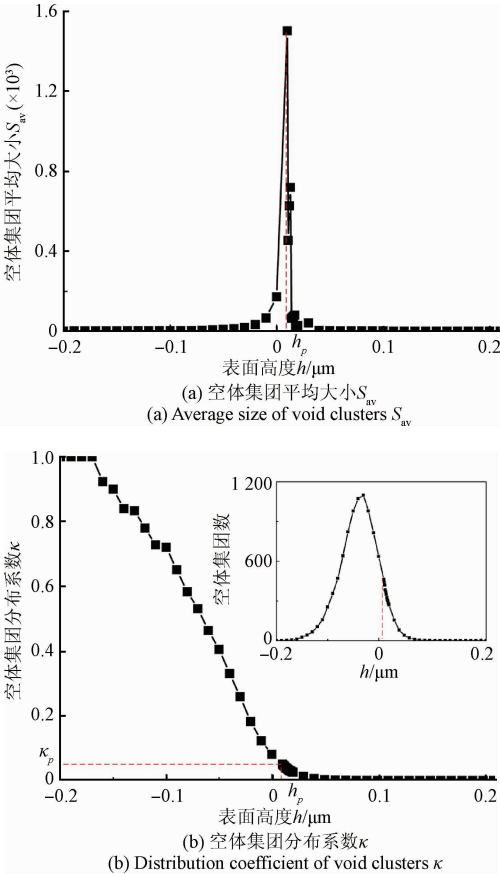


图 4 表面逾渗表征参数随表面高度  $h$  的变化  
Fig. 4 Surface percolation characterization parameters vary with surface height  $h$

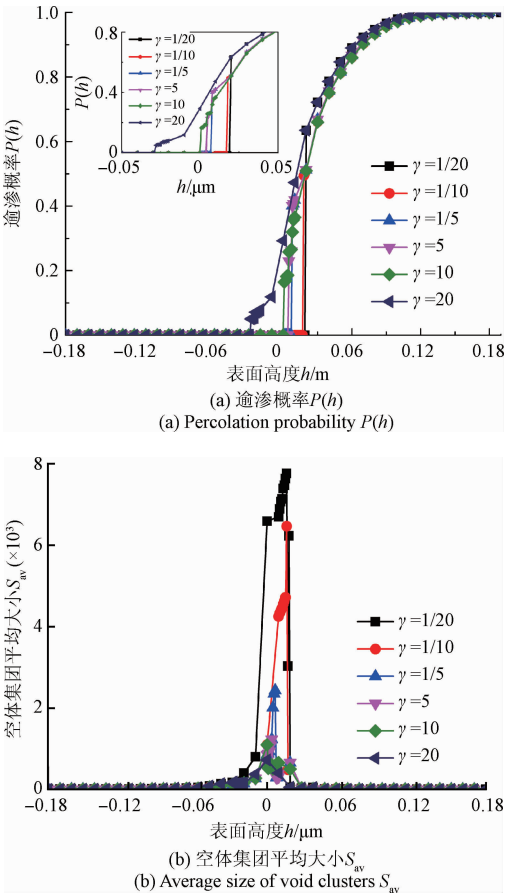
从图 4(b)可以看出,空体集团分布系数  $\kappa$  随表面高度  $h$  的增加呈先减小后缓慢趋向于无穷小趋势,这是由于靠近表面最低谷时,截面上多为独立空体位置构成的非跨越空体集团,平均每个空体位置包含的空体集团数为 1 即  $\kappa$  值为 1;随表面高度  $h$  的增加,空体区域面积增大,同时如图 4(b)所示空体集团数呈先增大后减小的趋势,导致平均每个空体位置包含的空体集团数目即空体集团分布系数  $\kappa$  减小并出现急转现象,且逾渗现象发生时表面高度  $h_p$  对应的空体集团分布系数  $\kappa$  位于曲线急转变化处,用  $\kappa_p$  表示表面高度  $h_p$  对应的  $\kappa$ ,其值为 0.05。

同理,沿纵向即  $x$  向搜索跨越空体集团,表面各逾渗表征参数随表面高度  $h$  的变化规律与上述所示结果完全一致,体现了表面的各向同性性质。

2.2 各向异性表面的逾渗特性

定义自相关长度  $\beta_x$  与  $\beta_y$  的比值为表面纹理方向参数,用  $\gamma$  表示,  $\gamma > 1$  生成的表面具有横向纹理特征,同时  $\gamma$  越大,横向即平行于  $y$  方向纹理特征越明显;反之,  $\gamma < 1$  生成的表面具有纵向纹理特征,且  $\gamma$  越小,纵向即平行于  $x$  向纹理特征越明显<sup>[26]</sup>。本文取  $\beta_x$  分别为 60、30、15  $\mu m$ ,  $\beta_y$  为 3  $\mu m$ ;反之,取  $\beta_x$  为 3  $\mu m$ ,  $\beta_y$  分别为 15、30、60  $\mu m$ ,则得到表面纹理方向参数  $\gamma$  分别为 20、10、5、1/5、1/10、1/20 的具有不同纹理特征各向异性表面,其中表面均方根粗糙度  $\sigma$  取值为 0.05  $\mu m$ ,表面大小为 128  $\mu m \times 128 \mu m$ ,生成表面的均方根粗糙度  $S_q$  在 0.049 7 ~ 0.049 9  $\mu m$ 。

图 5(a) ~ (c) 所示分别为各向异性表面逾渗概率  $P(h)$ 、空体集团平均大小  $S_{av}$  和空体集团分布系数  $\kappa$  随表面高度  $h$  的变化。沿  $y$  方向搜索跨越空体集团,在相同尺度范围条件下,从图 5(a)可以看出,随表面高度  $h$  由高向低逐渐减小,表面纹理方向参数  $\gamma$  值由小到大的表面其逾渗概率依次发生突变,对应逾渗发生时表面高度  $h_p$  依次从 0.019 降低到 -0.029  $\mu m$ ,由于随表面高度  $h$  逐渐降低,  $\gamma$  值越小的表面,平行  $x$  向分布的实体材料区面积增加越显著,容易阻断跨越空体集团沿  $y$  向的长程连接性,使得逾渗概率  $P(h)$  越先发生突变。



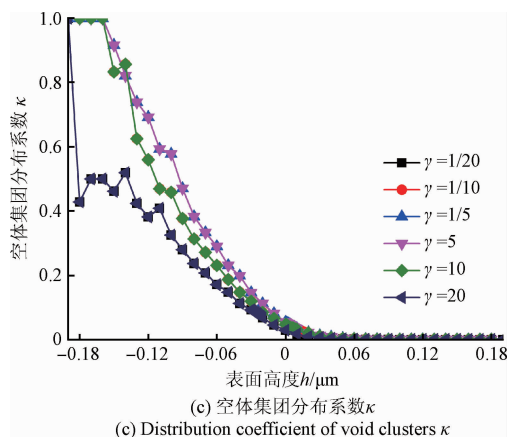


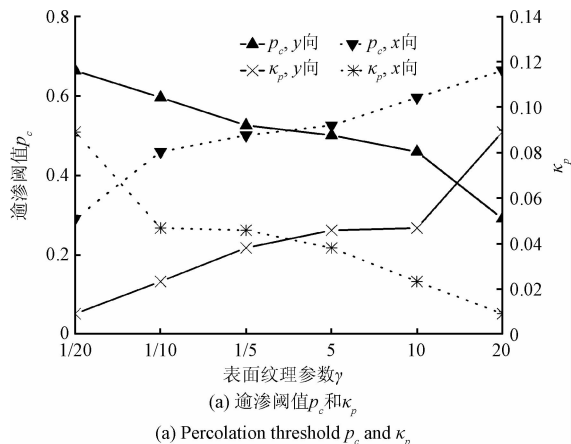
图5 各向异性表面的逾渗表征参数随表面高度  $h$  的变化

Fig. 5 Percolation characterization parameters vary with surface height  $h$  for anisotropic surface

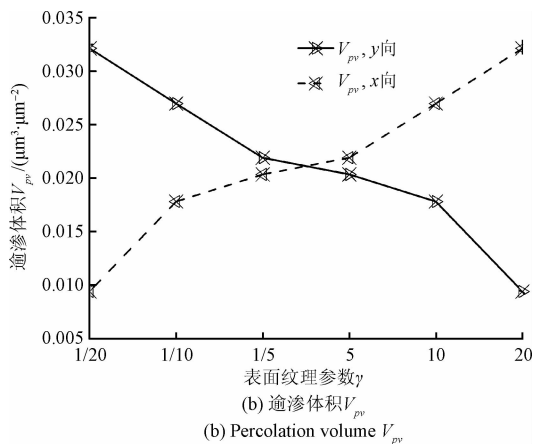
从图5(b)可以看出,表面纹理方向参数  $\gamma$  越大,空体集团平均大小  $S_{av}$  的最大值越小,这是由于表面纹理方向参数  $\gamma$  值越大,表面平行于  $y$  方向的纹理越明显,随着表面高度  $h$  的增加,空体位置先沿纹理方向相互连接形成跨越空体集团,但表面纹理方向参数  $\gamma$  值越小,平行于  $x$  方向的纹理越明显,阻碍了沿  $y$  方向上空体位置的相互合并,导致非跨越空体集团平均大小增大到一定程度后才发生相互连接成跨越  $y$  向的空体集团的现象。从图5(c)可以看出,空体集团分布系数  $\kappa$  随表面高度  $h$  的变化整体趋势呈先迅速减小后平缓趋向于无穷小,且  $h_p$  高度值对应的  $\kappa_p$  均位于曲线的急转处。图6所示分别为沿  $x$  和  $y$  向搜索跨越空体集团时,表面逾渗阈值  $p_c$ 、逾渗体积  $V_{pv}$  和表面逾渗现象发生时空体集团分布系数  $\kappa_p$  与表面纹理方向参数  $\gamma$  间的关系。

从图6(a)、(b)可以看出,沿  $y$  向搜索跨越空体集团时,表面逾渗阈值  $p_c$  和逾渗体积  $V_{pv}$  均随表面纹理方向参数  $\gamma$  值的增大而减小,相反逾渗发生时空体集团分布系数  $\kappa_p$  随表面纹理方向参数  $\gamma$  值的增大呈增大趋势;而沿  $x$  向搜索跨越空体集团,表面逾渗阈值  $p_c$ 、逾渗体积  $V_{pv}$  和表面逾渗现象发生时空体集团分布系数  $\kappa_p$  随表面纹理方向参数  $\gamma$  的变化规律与沿  $y$  向搜索规律完全相反,同时表面纹理越明显时,  $x$  与  $y$  方向逾渗表征参数间的差异越大。这主要受表面纹理的影响,  $\gamma$  值越大,平行  $y$  方向的纹理越明显,有利于  $y$  方向上空体位置相互合并,但加剧阻碍了  $x$  方向上空体位置的连通,因此  $\gamma$  越大的表面,越容易在相对表面高度  $h$  较低的截面上出现跨越  $y$  向的空体集团,此时表面空体集团分布系数  $\kappa$  较大,而由表面支承率获得的逾渗阈值  $p_c$  和逾渗体积  $V_{pv}$  较

小。任晓等人<sup>[26]</sup>在研究粗糙表面气体密封性能时得到  $\gamma > 1$  时压力流量因子几乎都大于1,不利于气体密封;相反  $\gamma < 1$  时流量因子小于1,有利于密封,与图6相比较,  $\gamma$  越小,其对应的表面逾渗表征参数  $p_c$  和  $V_{pv}$  值越大,  $\kappa_p$  值越小,表明该表面密封性越好。



(a) Percolation threshold  $p_c$  and  $\kappa_p$



(b) Percolation volume  $V_{pv}$

图6 各向异性表面的逾渗参数与表面纹理方向参数  $\gamma$  的关系

Fig. 6 Relationship of percolation parameters and surface texture parameter for anisotropic surfaces

### 2.3 各向同性表面的逾渗特性

对于各向同性表面,自相关长度  $\beta_x$  值越大,表面结构轮廓越“宽松”;反之,自相关长度  $\beta_x$  值越小,表面结构轮廓越“紧密”。由于生成的粗糙表面具有随机特性,表面微凸体随机分布情况会影响各向同性表面的逾渗特性,为了使结果更可靠,本文取表面自相关长度  $\beta_x$  分别为3、9、15、24、30  $\mu\text{m}$ ,  $\beta_y = \beta_x$ ,表面大小为128  $\mu\text{m} \times 128 \mu\text{m}$ ,表面均方根粗糙度  $\sigma$  取值为0.05  $\mu\text{m}$ ,分别模拟生成表面10次,得到5组具有不同自相关长度的各向同性表面。生成的表面均方根粗糙度  $S_q$  值在0.047 ~ 0.05  $\mu\text{m}$ 。分别沿  $x$  和  $y$  向搜索跨越空体集团,并对所有

结果进行平均化处理。图 7 所示为各组各向同性表面逾渗现象发生时各逾渗表征参数平均值与表面自相关长度  $\beta_x$  的关系。

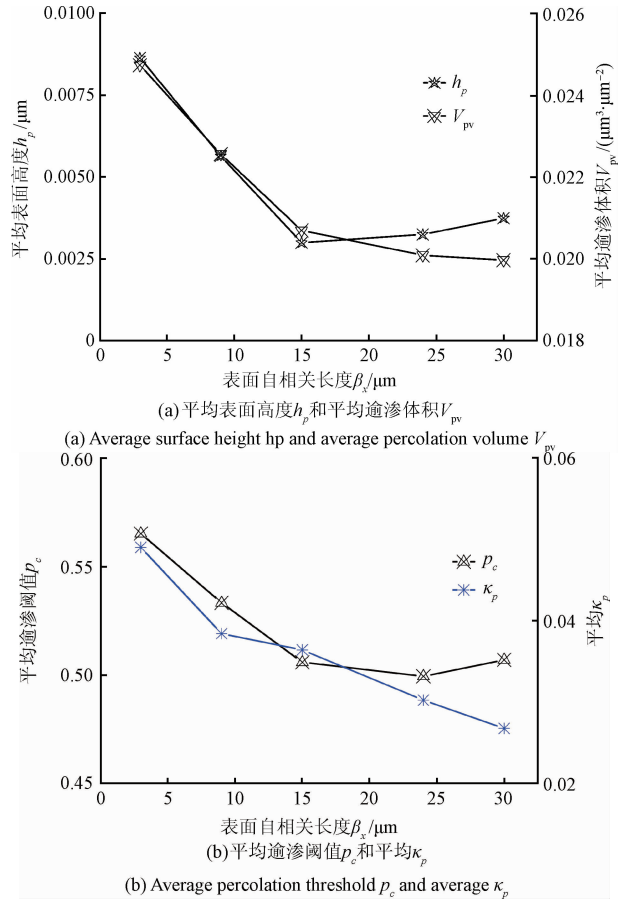


图 7 各向同性表面的逾渗参数与表面自相关长度  $\beta_x$  的关系

Fig. 7 Relationship of percolation parameters and surface autocorrelation length  $\beta_x$  for isotropic surfaces

从图 7 可以看出,随着表面形貌自相关长度  $\beta_x$  的增大,表面形貌逾渗现象发生时平均表面高度  $h_p$  和平均逾渗阈值  $p_c$  呈先减小后小幅增大的变化趋势,而平均逾渗体积  $V_{pv}$  和逾渗发生时平均空体集团分布系数  $\kappa_p$  呈逐渐减小趋势,表面自相关长度  $\beta_x$  越大,表面起伏越平缓,峰谷间的水平距离越大,因此相同表面高度  $h$  的截面上空体位置有利于相互连接形成数量少、平均大小较大的非跨越空体集团,随着表面高度  $h$  进一步增大,较大的非跨越空体集团越先容易相互连通形成跨越空体集团,则对应表面的逾渗表征参数  $h_p$ 、 $p_c$ 、 $V_{pv}$  和  $\kappa_p$  较小,但当自相关长度  $\beta_x$  较大时,表面随机分布的较大微凸体影响空体位置的相互合并,使得平均表面高度  $h_p$  和平均逾渗阈值  $p_c$  略微增大。

2.4 三维表征参数与表面逾渗特性的关系

本节选取了 ISO25178 三维参数体系中的部分参数

对表面形貌进行表征,初步探究三维表征参数与表面逾渗特性之间的关系。采用三维表征参数  $S_a$ 、 $S_{dq}$  表征表面形貌,其中  $S_a$  为表面算术平均偏差,对表面高度一个总体的度量; $S_{dq}$  为表面均方根斜率,对表面斜率一般性的度量,用来区分有相同高度参数值的表面。对 3.3 节自相关长度不同的各组各向同性表面进行表面三维表征参数  $S_a$ 、 $S_{dq}$  的求取,并对各组计算结果进行平均化处理来表征各组表面形貌。图 8 所示为 3.3 节各向同性表面各组表面表征参数  $S_a$  和  $S_{dq}$  与平均逾渗阈值  $p_c$  和逾渗体积  $V_{pv}$  间的关系。

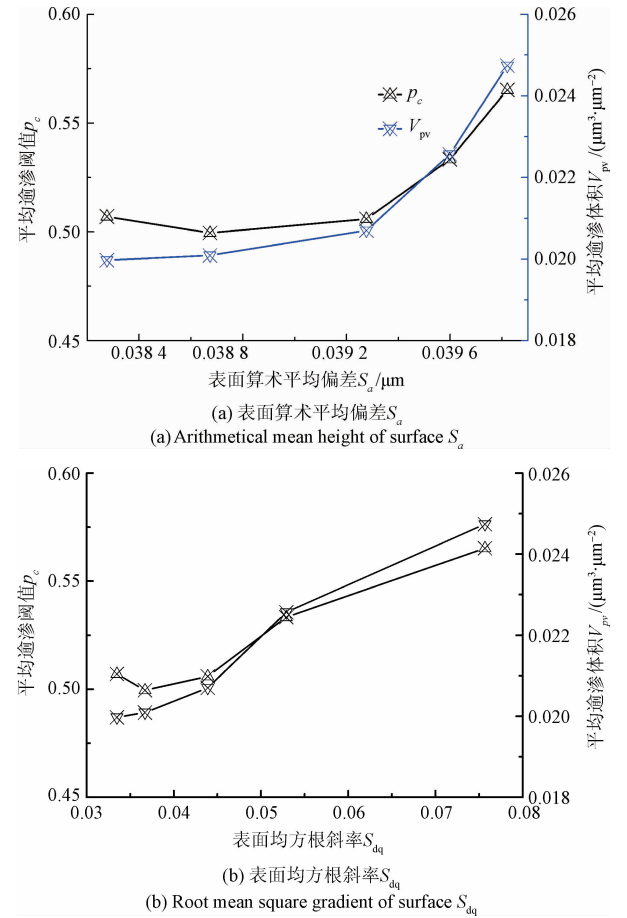


图 8 表面三维表征参数与表面平均逾渗阈值  $p_c$  和逾渗体积  $V_{pv}$  的关系

Fig. 8 Relationship of 3D characterization parameters and the average percolation threshold  $p_c$  and the average percolation volume  $V_{pv}$

从图 8 可以看出,随着表面算术平均偏差  $S_a$  和均方根斜率  $S_{dq}$  的增大,表面平均逾渗阈值  $p_c$  与逾渗体积  $V_{pv}$  整体呈逐渐增大的趋势。表面算术平均偏差  $S_a$  越大,表面形貌越粗糙,谷间的连通性较差,逾渗现象容易发生在较高的表面高度截面上,使得表面逾渗阈值  $p_c$  和逾渗体积  $V_{pv}$  增大,流体不容易跨越微凸体流动,有利于表面密

封和储油。表面均方根斜率  $S_{dq}$  越小,说明表面上尖锐的微结构较少,且尖锐程度较低,表面形貌越平坦,有利于空体位置的相互连接,使得表面逾渗阈值  $p_c$  和逾渗体积  $V_{pv}$  减小,流体容易跨越微凸体流动,有利于表面润滑。

### 3 应用

图9所示为一个典型的铝合金各向异性表面,该表面存在明显的沿  $y$  方向纹理。使用 Talysurf CCI 2000 白光干涉三维轮廓仪对表面形貌进行测量,得到图9(a)所示的铝合金表面三维扫描图,表面的采样面积为  $820\ \mu\text{m} \times 820\ \mu\text{m}$ ,采样间隔  $1.6\ \mu\text{m}$ ,表面均方根粗糙

度  $S_q$  为  $0.793\ 4\ \mu\text{m}$ ,表面  $x$  与  $y$  方向谷间连通性存在明显差异。图9(b)、(c)所示为从表面最低谷到最高峰依次截取表面,  $y$  和  $x$  方向首次出现跨越空体集团的截面二值图像,可以明显看出  $y$  方向比  $x$  方向首次出现跨越空体集团的截面上空体区域面积少,说明谷间的相互连接性较好。表面逾渗表征参数的计算结果如图9(d)~(f)所示。表面  $y$  和  $x$  方向逾渗发生时的表面高度  $h_p$  分别为  $-1.26$  和  $0.74\ \mu\text{m}$ ,根据表面支撑率曲线,得到表面  $y$  和  $x$  方向的逾渗阈值  $p_c$  分别为  $0.043\ 8$  和  $0.852\ 9$ ,相应的逾渗体积  $V_{pv}$  分别为  $4.387\ 3 \times 10^{-4}$  和  $36.785\ 9 \times 10^{-4}\ \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ,由这些参数能轻易区分  $y$  与  $x$  方向不同拓扑结构表面形貌润滑和密封等性能的优劣。

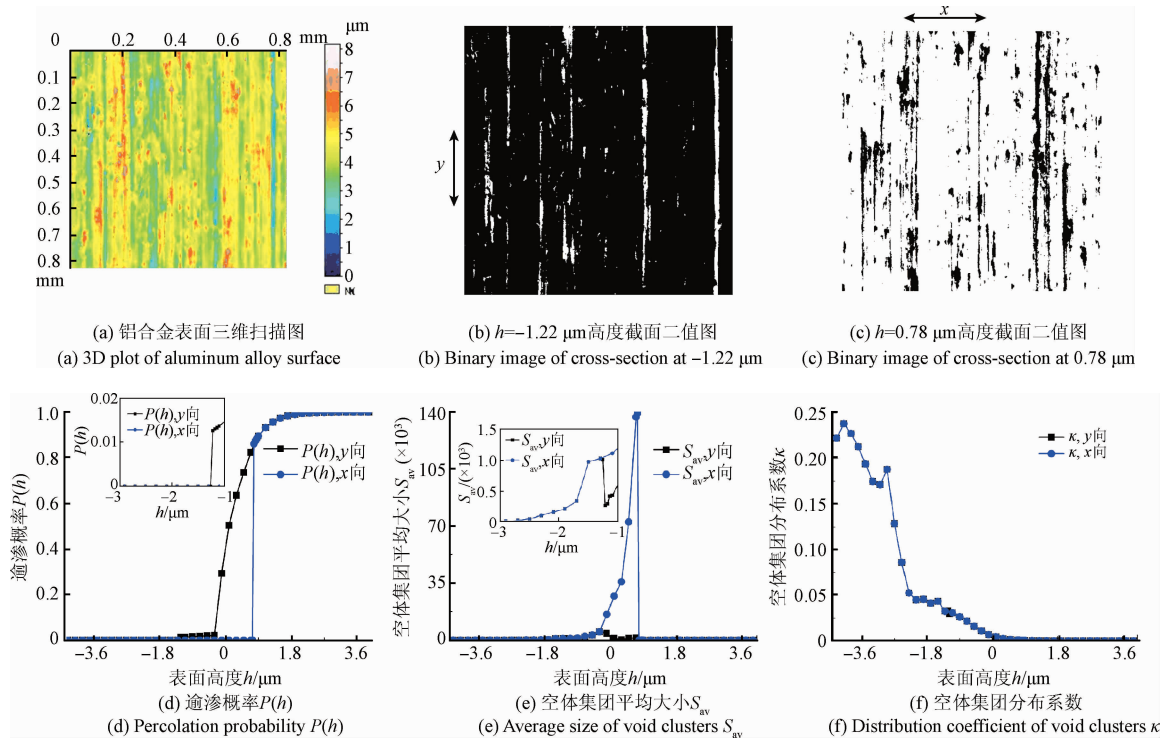


图9 铝合金表面三维扫描图和  $y$ 、 $x$  方向首次出现跨越空体集团高度截面二值图及相应的逾渗表征参数变化规律

Fig. 9 The 3D plot of aluminum alloy surface and binary image of cross-section when the spanning void cluster appears at  $y$  and  $x$  directions for the first time and the variation law of surface percolation characterization parameters

### 4 结论

本文基于逾渗理论研究了三维表面形貌的逾渗特性,提出了相应的表征参数,分析了表面逾渗表征参数随表面高度的变化规律,并探究了表面结构表征参数与表面逾渗特性表征参数间的关联,得到如下结论。

1) 基于逾渗理论的表面形貌逾渗特性的表征方法能够有效地描述表面空体区域的连接性,这种方法具有明确的意义和可靠的算法。

2) 三维表面形貌逾渗概率随着表面高度的降低发生突变,反映出表面形貌空体区域连接性的本质性变化;其次空体集团平均大小随表面高度的增加整体呈先增大后减小趋势;空体集团分布系数随表面高度的增加呈先减小后缓慢趋向于无穷小趋势,且逾渗现象发生在曲线的急转处。

3) 表面均方根粗糙度相近、结构不同的各向异性表面,沿横向搜索跨越空体集团时,表面逾渗现象发生时表面高度  $h_p$ 、逾渗阈值  $p_c$  和逾渗体积  $V_{pv}$  随表面纹理方向参数  $\gamma$  的增大而减小,相反空体集团分布系数  $\kappa_p$  随  $\gamma$  的



增大而增大,而沿纵向搜索跨越空体集团时,逾渗发生时各逾渗表征参数随表面纹理参数 $\gamma$ 的变化与横向搜索时变化规律相反;表面均方根粗糙度相近而结构不同的各向同性表面,平均表面高度 $h_p$ 和平均逾渗阈值 $p_c$ 随表面自相关长度 $\beta_x$ 的增大呈先减小后小幅增大趋势,平均逾渗体积 $V_{pv}$ 和空体集团分布系数 $\kappa_p$ 随表面自相关长度 $\beta_x$ 的增大而呈逐渐减小趋势。

4)表面三维表征参数与其逾渗特性之间具有一定的关联性。表面平均逾渗阈值 $p_c$ 与逾渗体积 $V_{pv}$ 随着表面算术平均偏差 $S_a$ 和均方根斜率 $S_{dq}$ 的增大整体呈增大趋势。

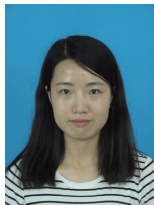
## 参考文献

- [1] WHITEHOUSE D J. Function maps and the role of surfaces [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(13): 1847-1861.
- [2] 刘坚,路恩会,易怀安,等.基于图像质量的磨削表面粗糙度检测[J].电子测量与仪器学报,2016,30(3):374-381.  
LIU J, LU EN H, YI H AN, et al. Grinding surface roughness measurement based on image quality assessment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 374-381.
- [3] BHUSHAN B. Introduction to tribology [M]. 2nd Edition. Newyork: John Wiley & Sons Ltd, 2013.
- [4] 史建成,刘检华,杨志猛,等.基于栅格渗漏模型的静密封界面状态演变特性研究[J].机械工程学报,2016,52(7):104-113.  
SHI J CH, LIU J H, YANG ZH M, et al. On the phase transition characteristic of static sealing interface based on lattice leakage model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 104-113.
- [5] TRIPP J H, GARTE S. The gas-tightness of separable base metal electric contacts [J]. IEEE Transactions on Components Hybrids & Manufacturing Technology, 1981, 4(1): 85-92.
- [6] SAHLIN F. Lubrication, contact mechanics and leakage between rough surfaces [D]. Sweden: Lulea University of Technology, 2008.
- [7] PUTIGNANO C, AFFERRANTE L, CARBONE G, et al. A multiscale analysis of elastic contacts and percolation threshold for numerically generated and real rough surfaces [J]. Tribology International, 2013, 64(3): 148-154.
- [8] 嵇正波,孙见君,马晨波,等.接触式机械密封界面泄漏机理研究的关键科学问题[J].化工学报,2017,68(8):2969-2978.  
JI ZH B, SUN J J, MA CH B, et al. Key scientific problems for studying leakage mechanism of contact mechanical seal interface [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2017, 68(8): 2969-2978.
- [9] DONG W P, SULLIVAN P J, STOUT K J. Comprehensive study of parameters for characterization three-dimensional surface topography III [J]. Wear, 1994, 178(1): 45-60.
- [10] 张维强,陈国强.基于地貌学的零件表面三维形貌评定[J].机械设计与研究,2007,23(2):76-79.  
ZHANG W Q, CHEN G Q. 3D Micro-geometry of machine part surface based on geomorphology [J]. Machine Design and Research, 2007, 23(2): 76-79.
- [11] 朱华,葛世荣,陈国安.磨合表面形貌变化的分形表征[J].机械工程学报,2001,37(5):68-71.  
ZHU H, GE SH R, CHEN G AN. Characterization of surface topography during running-in process with fractal parameter [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(5): 68-71.
- [12] 杨红平,傅卫平,王雯,等.小波系数表征机械加工表面分形特征的计算方法[J].仪器仪表学报,2010,31(7):1454-1459.  
YANG H P, FU W P, WANG W, et al. Calculation method for fractal characteristics of machining topography surface based on wavelet coefficients [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(7): 1454-1459.
- [13] 杨蕾,卢荣胜,雷丽巧.基于小波变换的散斑纹理表面粗糙度信息提取[J].电子测量与仪器学报,2012,26(12):1091-1095.  
YANG L, LU R SH, LEI L Q. Information extraction of surface roughness measurement based on wavelet transform of speckle pattern texture [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(12): 1091-1095.
- [14] 乐静,杨洁,王建,等.基于多层序列图像的三维表面粗糙度检测[J].仪器仪表学报,2010,31(9):2036-2041.  
LE J, YANG J, WANG J, et al. Three-dimensional surface roughness measurement based on sequence multi-images [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 2036-2041.
- [15] PFESTORF M, ENGEL U, GEIGER M. Three-dimensional characterization of surfaces for sheet metal forming [J]. Wear, 1998, 216(2): 244-250.
- [16] LIU X J, LIU K, WANG W, et al. Connectivity characterization of three-dimensional surface topography based on mathematical morphology [J]. Proceedings of the IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2009, 223(7): 941-947.

- [17] SENIN N, ZILIOTTI M, GROPPETTI R. Three dimensional surface topography segmentation through clustering [J]. *Wear*, 2007, 262 (3-4): 395-410.
- [18] WOLSKI M, PODSIADLO P, STACHOWIAK G W. Characterization of surface topography from small images [J]. *Tribology Letters*, 2016, 61(1): 1-14.
- [19] International Organization for Standardization. ISO25178-2:2012 Geometrical product specifications (GPS) surface texture: Areal, Part 1: Terms, definitions and surface texture parameters [S]. Switzerland, 2012.
- [20] PERSSON B N J, YANG C. Theory of the leak-rate of seals [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, 20(31): 315011.
- [21] BOTTIGLIONE F, CARBONE G, MANTRIOTA G. Fluid leakage in seals: An approach based on percolation theory [J]. *Tribology International*, 2009, 42 (5): 731-737.
- [22] GRIMMETT G. *Percolation* [M]. 2nd Edition. Berlin: Springer, 1999.
- [23] HOSHEN J, KOPELMAN R. Percolation and cluster distribution. I. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm [J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 1976, 14(8): 3438-3445.
- [24] 陈辉, 胡元中, 王慧, 等. 粗糙表面计算机模拟 [J]. *润滑与密封*, 2006(10): 52-55.  
CHEN H, HU Y ZH, WANG H, et al. Computer simulation of rough surface [J]. *Lubrication Engineering*, 2006(10): 52-55.

- [25] HU Y Z, TONDER K. Simulation of 3D random rough surface by 2D digital filter and Fourier analysis [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1992, 32(1): 83-90.
- [26] 任晓, 吴承伟, 周平. 粗糙表面的气体密封性能研究 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(16): 176-181.  
REN X, WU CH W, ZHOU P. Gas sealing performance study of rough surface [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(16): 176-181.

## 作者简介



张彤, 2012 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学博士研究生, 主要研究方向为数字化设计与制造。

E-mail: zthfut@126.com

**Zhang Tong** received her B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 2012. Now she is a Ph. D. candidate in Hefei University of Technology. Her main research interest is digital design and manufacture.



刘小君 (通讯作者), 2007 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为功能表面设计与制造技术。

E-mail: liuxjunhf@163.com

**Liu Xiaojun** (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2007. Now she is a professor and doctoral supervisor in Hefei University of Technology. Her main research interests include functional surface design and manufacturing technology.